

COMET Phase-I における 放射線環境の評価とその対策

中沢 遊 (大阪大学)

2017.02.22

23rd ICEPP Symposium



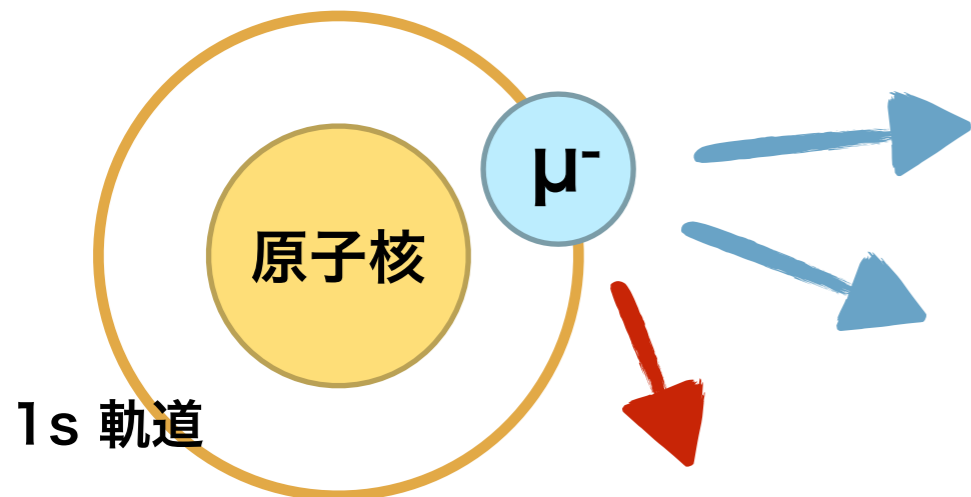
目次

- **イントロダクション**
 - ・ ミューオン電子転換過程
 - ・ COMET Phase-I 概要
 - ・ 読み出しボード (RECBE)
- **中性子対策**
 - ・ 中性子による影響
 - ・ 対策
- **中性子照射試験**
 - ・ セットアップ
 - ・ 測定結果
- **まとめ**

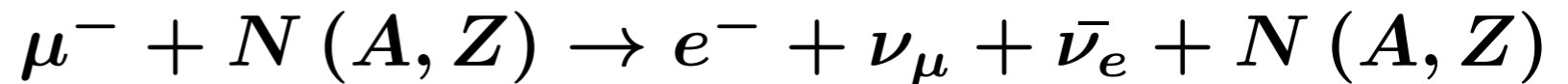
イントロダクション

ミューオン電子転換過程

ミューオニック原子



Decay In Orbit (DIO) (レプトンフレーバー保存)



ミューオン原子捕獲 (レプトンフレーバー保存)



ミューオン電子転換過程 (荷電レプトンフレーバー非保存)



$$E_e = m_\mu - B_{\text{atom}} - R_{\text{atom}} \quad (\text{単一エネルギーの電子})$$

Electron energy
Muon mass
Binding energy
Recoil energy

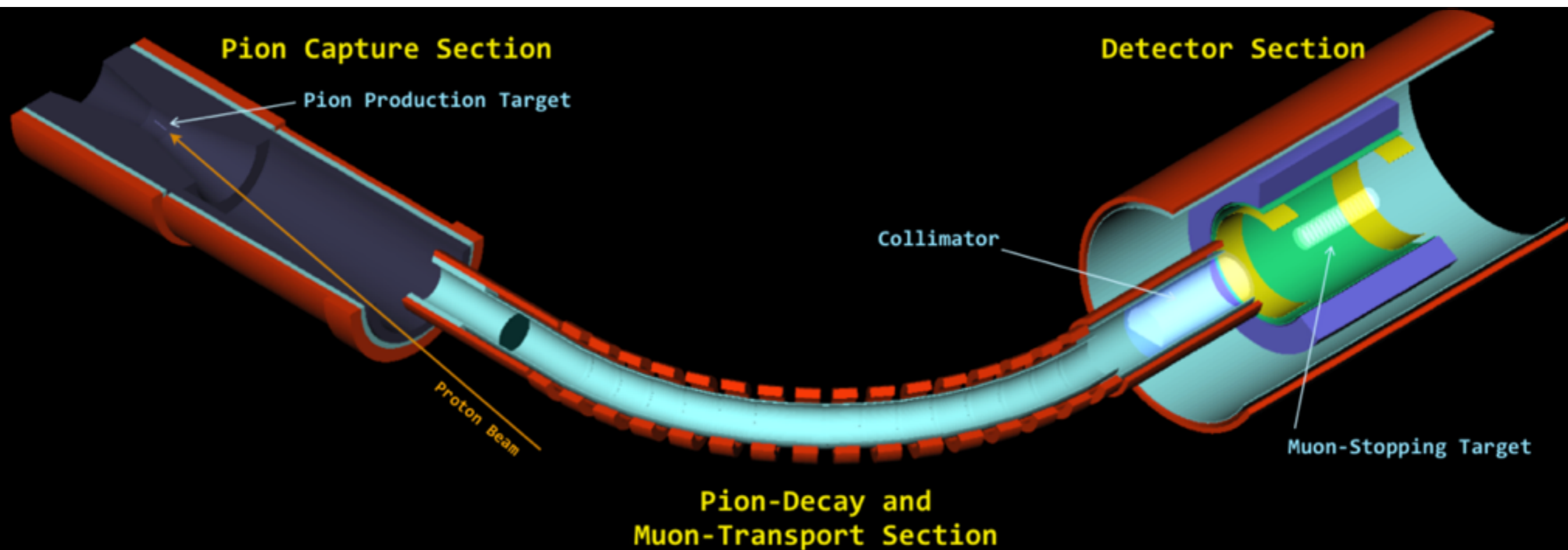
荷電レプトンフレーバー非保存現象の分岐比 ($\mu \rightarrow e \gamma$)

標準模型 : $O(10^{-54})$ → 厳しい制限

新物理 : $O(10^{-15})$

ミューオン電子転換過程の発見は新物理を示唆する

COMET Phase-I



目的：Al原子中でのミュオン電子転換過程探索

- ・ @J-PARC (2018/2019)
- ・ 150日間の測定で実験感度 (S.E.S) $\sim 3 \times 10^{-15}$ (先行実験の100倍)

検出器：Cylindrical Drift Chamber (CDC) & ストロー飛跡検出器

信号： ~ 105 MeV/c の単一エネルギーを持った電子

背景事象：Decay-In-Orbit (DIO) 電子 & ビーム由来の事象

CDC読み出しボード：Belle-IIで開発されたRECBE

Cylindrical Drift Chamber

運動量分解能 : $< 200 \text{ keV}/c$ for 105 MeV electrons

- 反跳エネルギーにより $100 \text{ MeV}/c$ 程度の運動量を持つ DIO 電子を信号と区別するため

封入ガス : ヘリウムベースの混合ガス

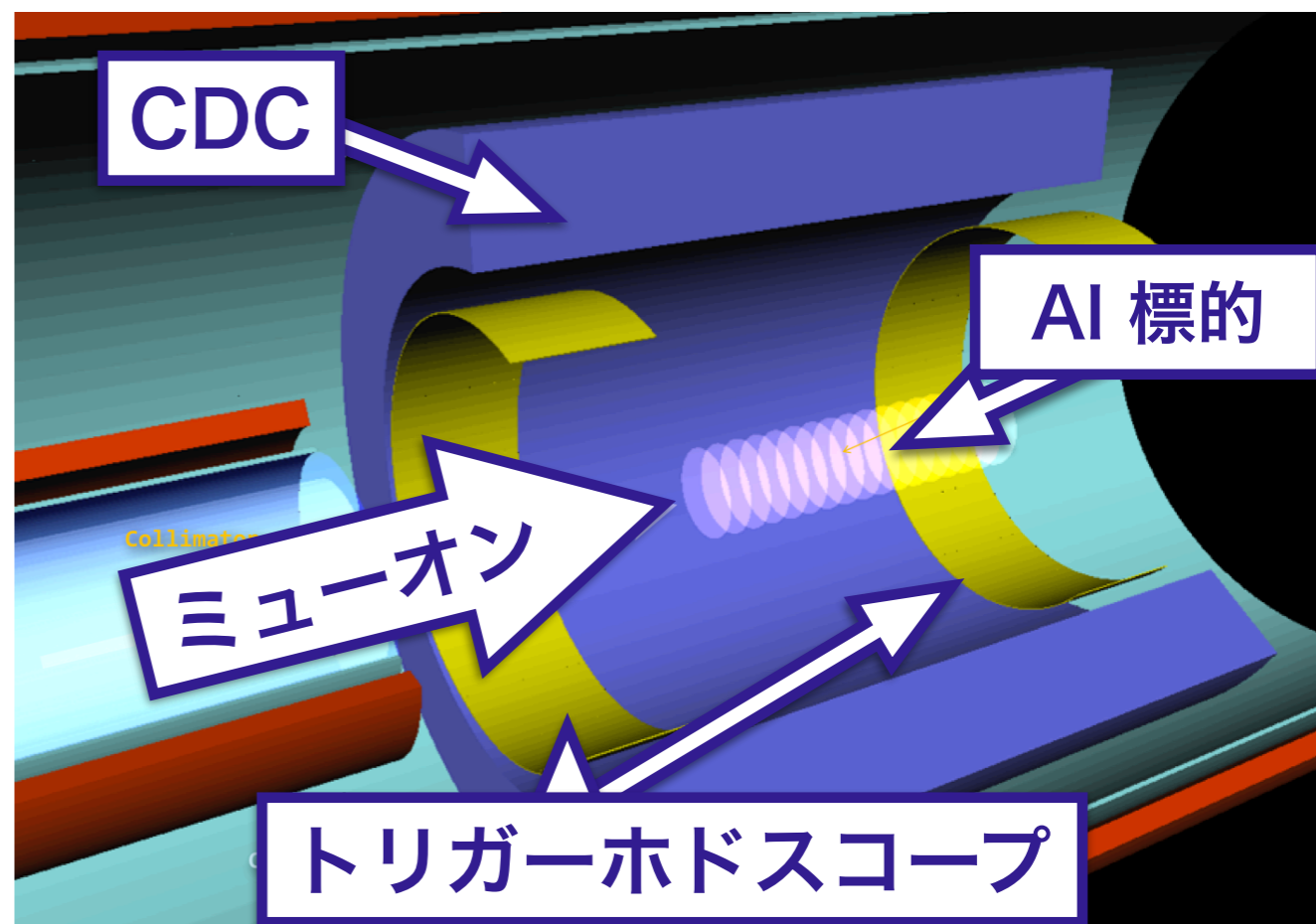
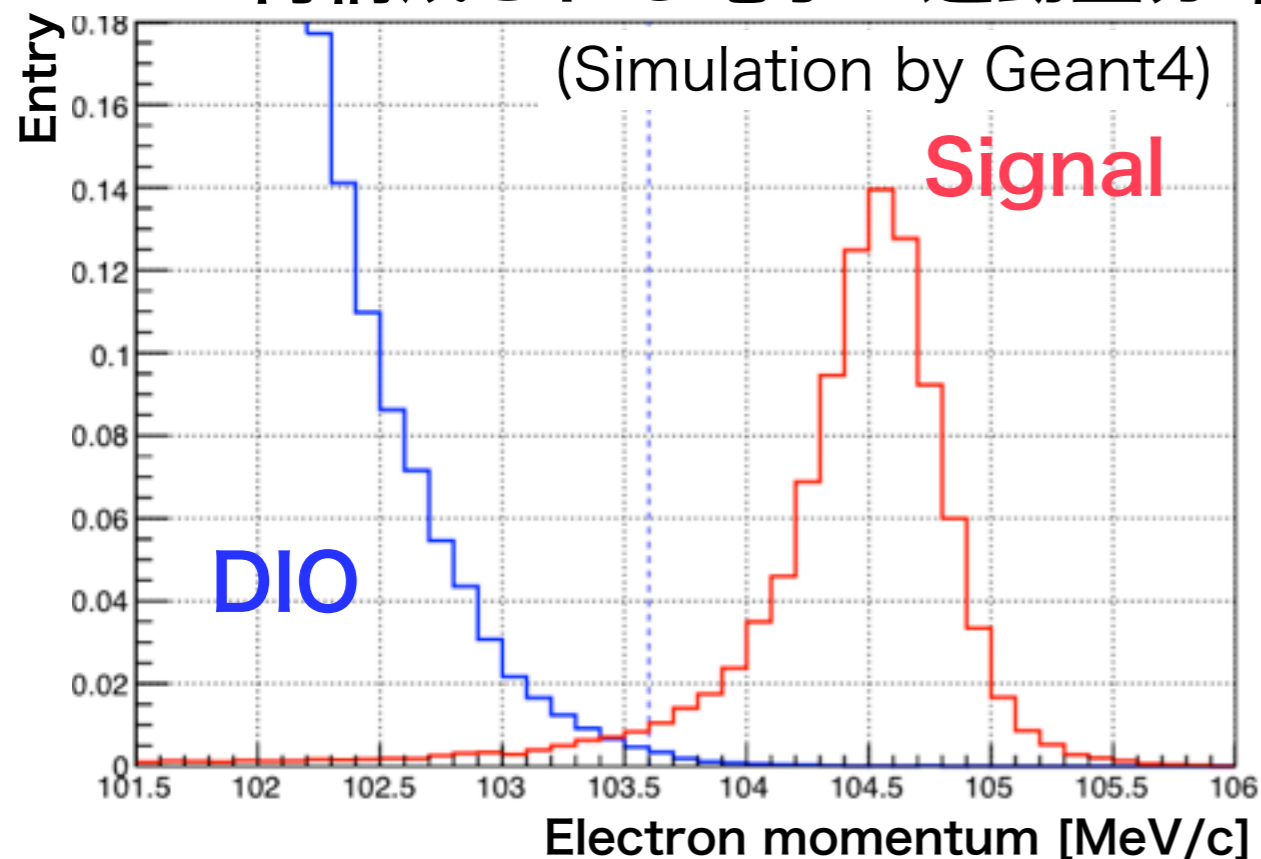
- CDC 内部での多重散乱の影響を抑えるための低物質量化

読み出し回路 : RECBE x 104 モジュール

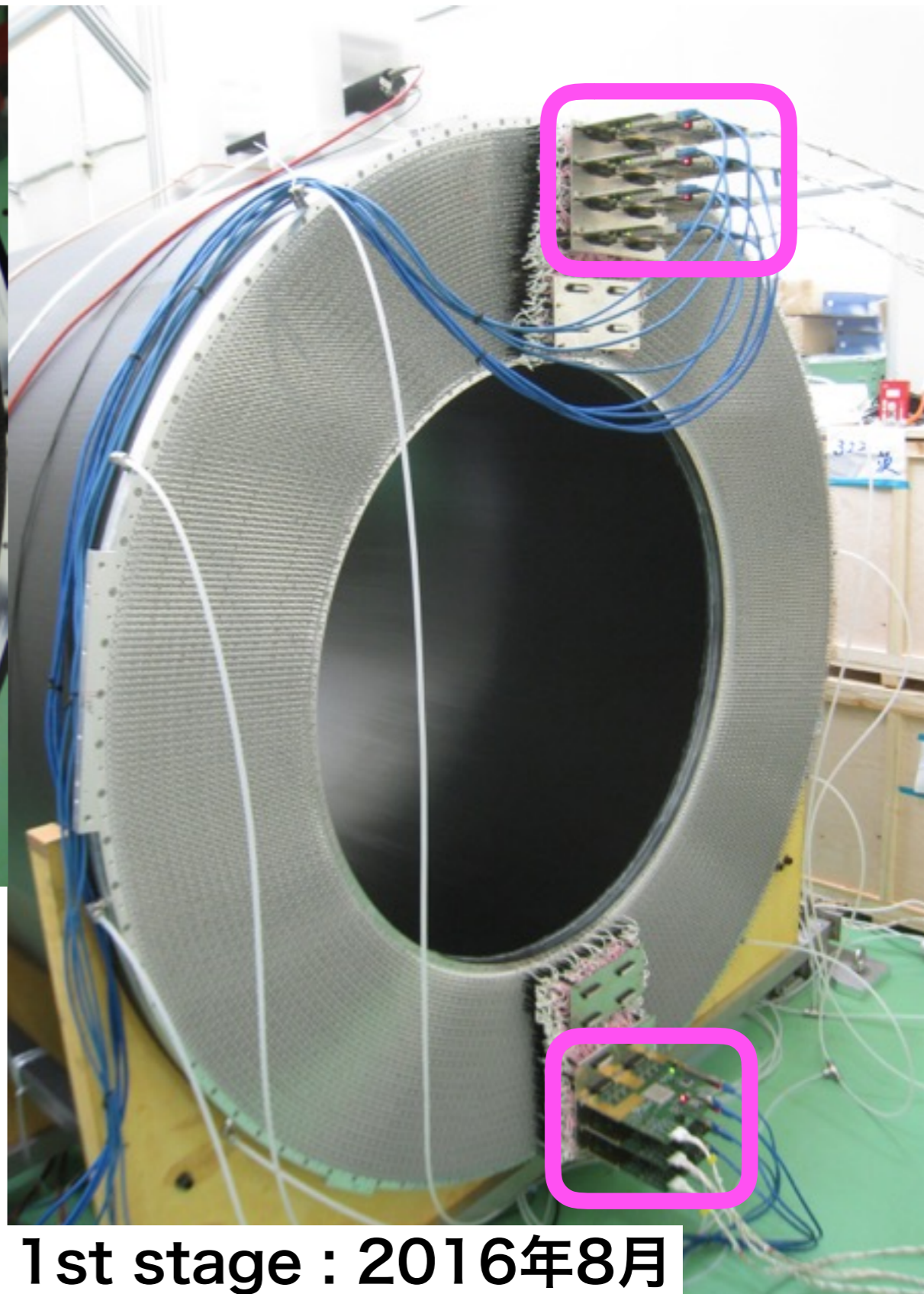
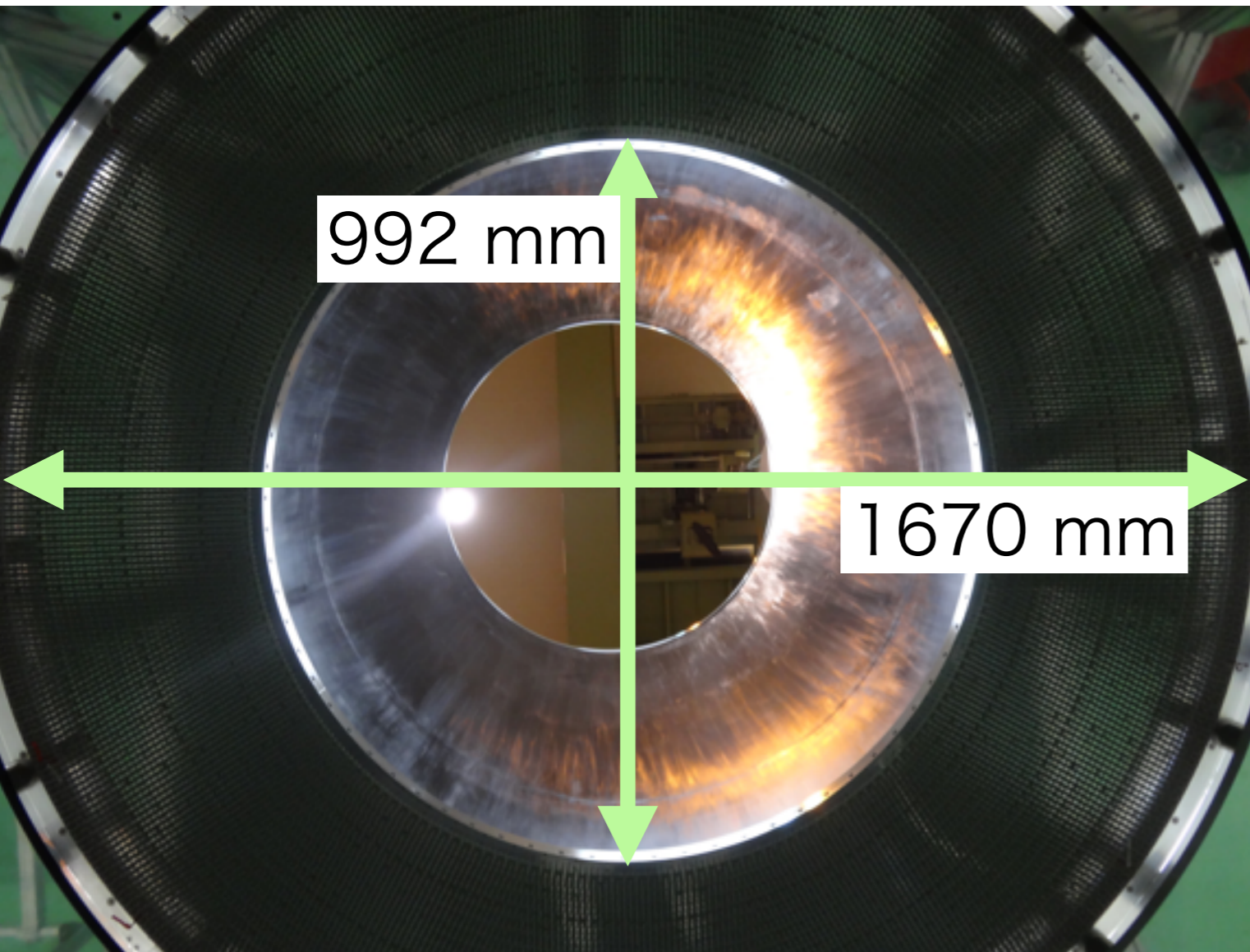
- 実機の量産及び性能評価が完了 @IHEP (中国)

評価項目 : ASD の性能、時間分解能、ノイズレベル等

CDCで再構成される電子の運動量分布



Cylindrical Drift Chamber



2016年6月11日 : CDC完成

**現在は実機のRECBEを7枚使った
宇宙線による性能試験中**

(参照 : Sam、沖中)

1st stage : 2016年8月

RECBE

仕様

CDCからの信号 48 ch/board

ASD (Amp Shaper Discriminator)

- 8ch/chip

ADC (AD9212)

- 8ch/chip
- 2 Vp-p を10 bit分解能でデジタル化
- 30 Msps

FPGA (Virtex-5 XC5VLX155T)

基本クロック : 120 MHz

RJ-45 (LVDS, JTAG)

LVDS : 共通動作クロック (40MHz)

トリガー信号の入力

Busy信号の出力

JTAG : ファームウェアのダウンロード

実機では除去

FPGA

ASD

ADC

LEMO
Connector

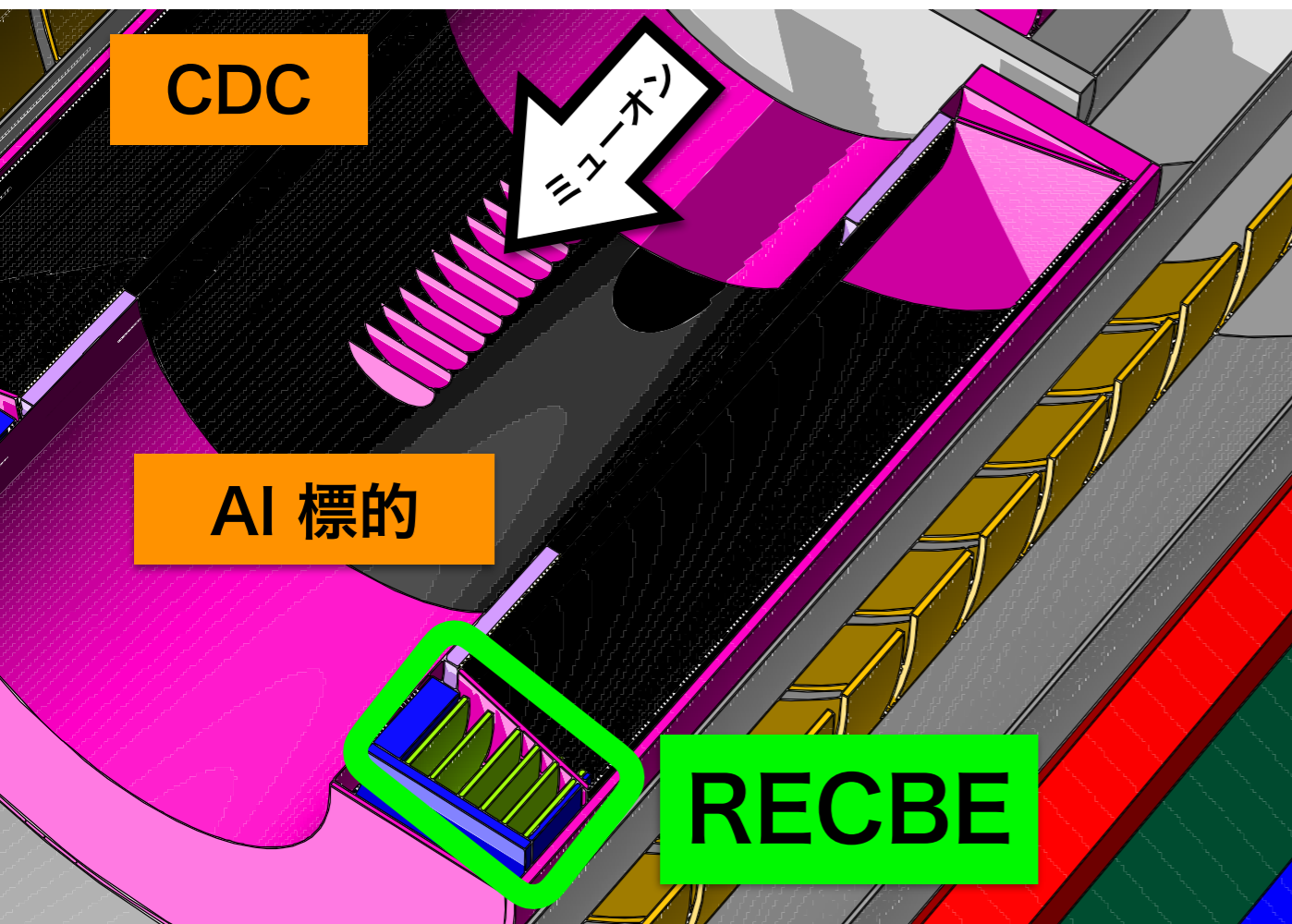
RJ45
Socket

SFP slot

トリガー信号

DAQ PC

COMET Phase-I における中性子流量



要求する中性子耐性 (150日間)
 $\sim 10^{12}$ neutrons/cm²

- ・ 過去の試験から永久的なハード損傷は確認されていない。
- ・ 修復可能なファームウェア損傷が多く発見されている。

RECBEの位置での中性子流量 (PHITS)

Neutron Energy [Mev]	Neutron Flux [n/cm ² /sec]
En < 0.1	5.89 × 10 ⁴
0.1 < En < 5	2.95 × 10 ⁴
5 < En < 10	8.03 × 10 ²
En > 10	1.36 × 10 ³

中性子対策

中性子による影響

- 中性子によるファームウェアの損傷: **Single Event Upset (SEU)**

- ・ 中性子と半導体原子との核反応による荷電粒子の生成
- ・ 荷電粒子のドリフトから生成される電子正孔対による論理反転
- ・ 複数同時発生したSEU : **Multi Bit Errors (MBE)**
- ・ SEUのおもな発生場所

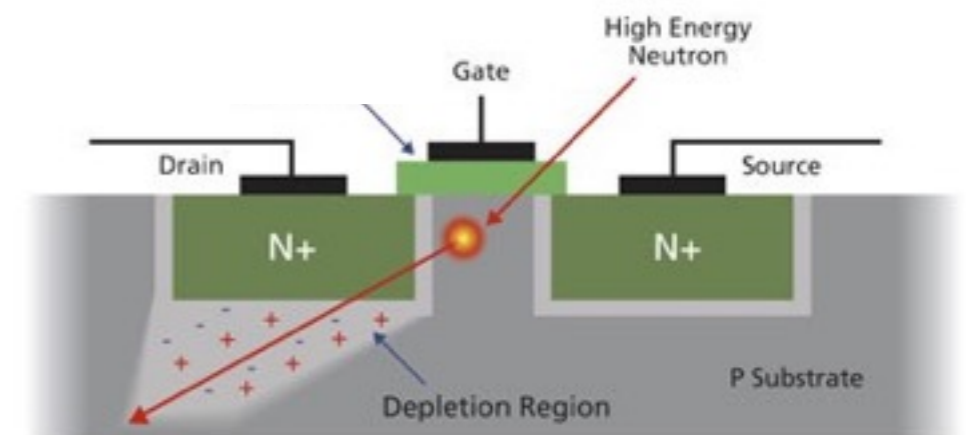
Configuration RAM : 回路構成を決定するRAM.

Block RAM : 一時的にデータを保管するRAM.

- 自動修復システム

- ・ “**検査ビット**” をデータに追加
- ・ 検査ビットとデータの関係性からエラーを検出
- ・ **Unrecoverable Error (URE)** : 修復不可能なエラー
 - ・ MBE
 - ・ 自動修復システムの破損
 - ・ 通信システムの破損 など...

SEU発生模式図



Ref : Cosmic rays damage automotive electronics
<http://www.embedded.com/print/4011077>

22nd ICEPP Symposium (2016)

22nd ICEPP Symposium

16

まとめ

COMET Phase-I 概要

- AI原子中でのミュオン電子転換過程をS.E.S. 10^{-15} で探索
- 高い運動分解能を要求する飛跡検出器 Cylindrical Drift Chamber
- Belle-IIグループによって開発された読み出しボードRECBEの使用

読み出しボードの中性子対策 **SEU controllerによるCRAMのためのSEU対策**

- SEU Controllerを実装したファームウェアでの中性子照射試験。

- SEU Controllerの動作確認完了
- SEUの発生頻度： $(2.12 \sim 4.25) \times 10^8$ Neutrons/SEU
- SEU vs URE：289 SEUs/URE

- さらなる対策

- パラフィンによる遮蔽

今回の話：TMRとBRAM用について

- ファームウェアの改良 (Triple Modular Redundancy、block RAM用自動修復機能)

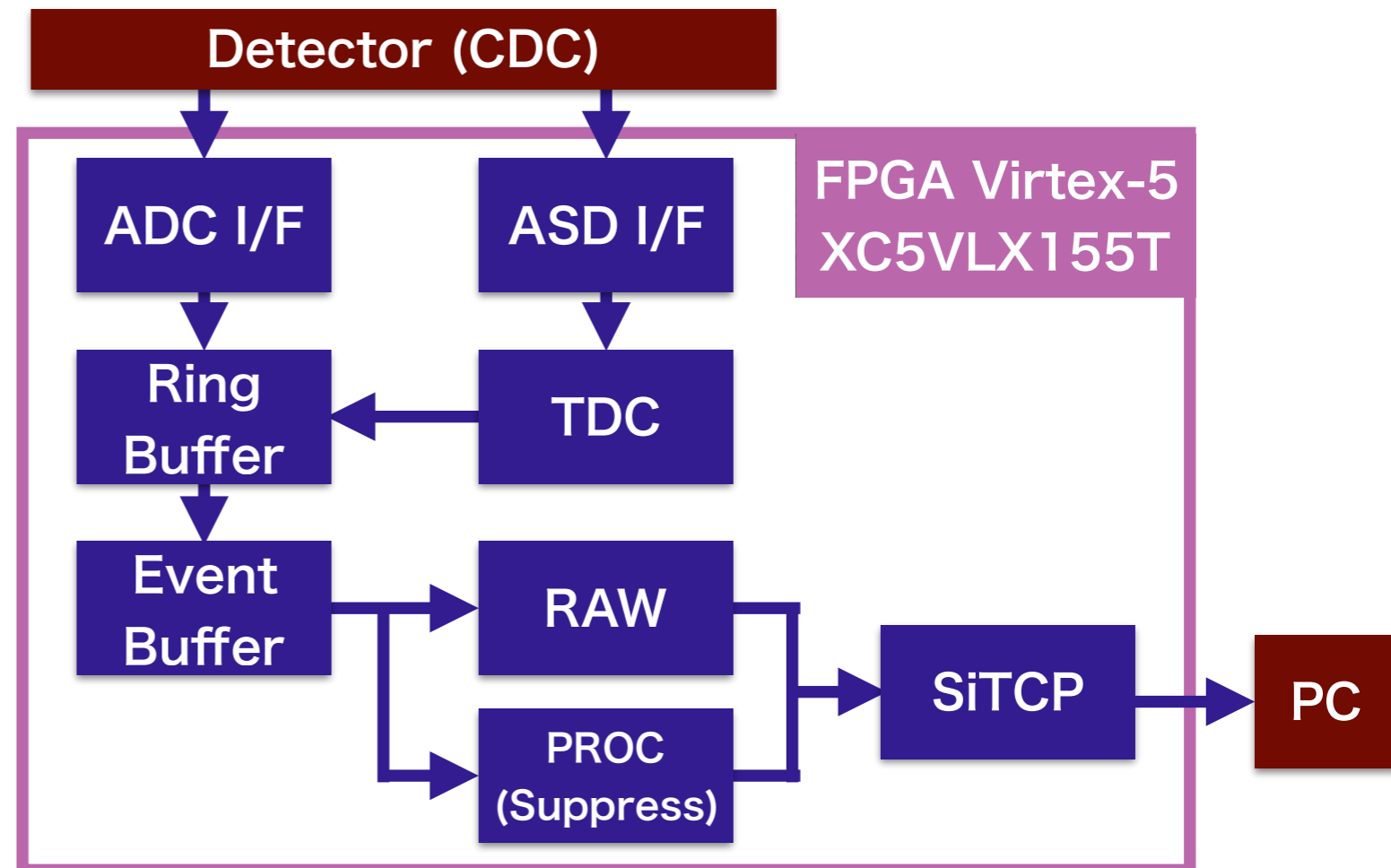
SEU Controller：Xilinx社によるCRAM用のエラー修復マクロ（使用していない領域も見てしまう）

Triple Modular Redundancy (TMR)：モジュールの三重化と多数決回路によるエラー対策

BRAM用自動修復機能：ECC

- Error Correction Code (ECC)
- Xilinx社のIP Coreのオプション
- ハミングコードを使ったエラー修復
- SEU -> 修正可
- MBE -> 修正不可
- 使用するBRAMの容量が大きい場合は未対応
 - ・ RAWやPROCに含まれるSiTCPへの接続部分のバッファ
 - ・ その他全てのバッファにECCを実装

RECBEのファームウェア構成

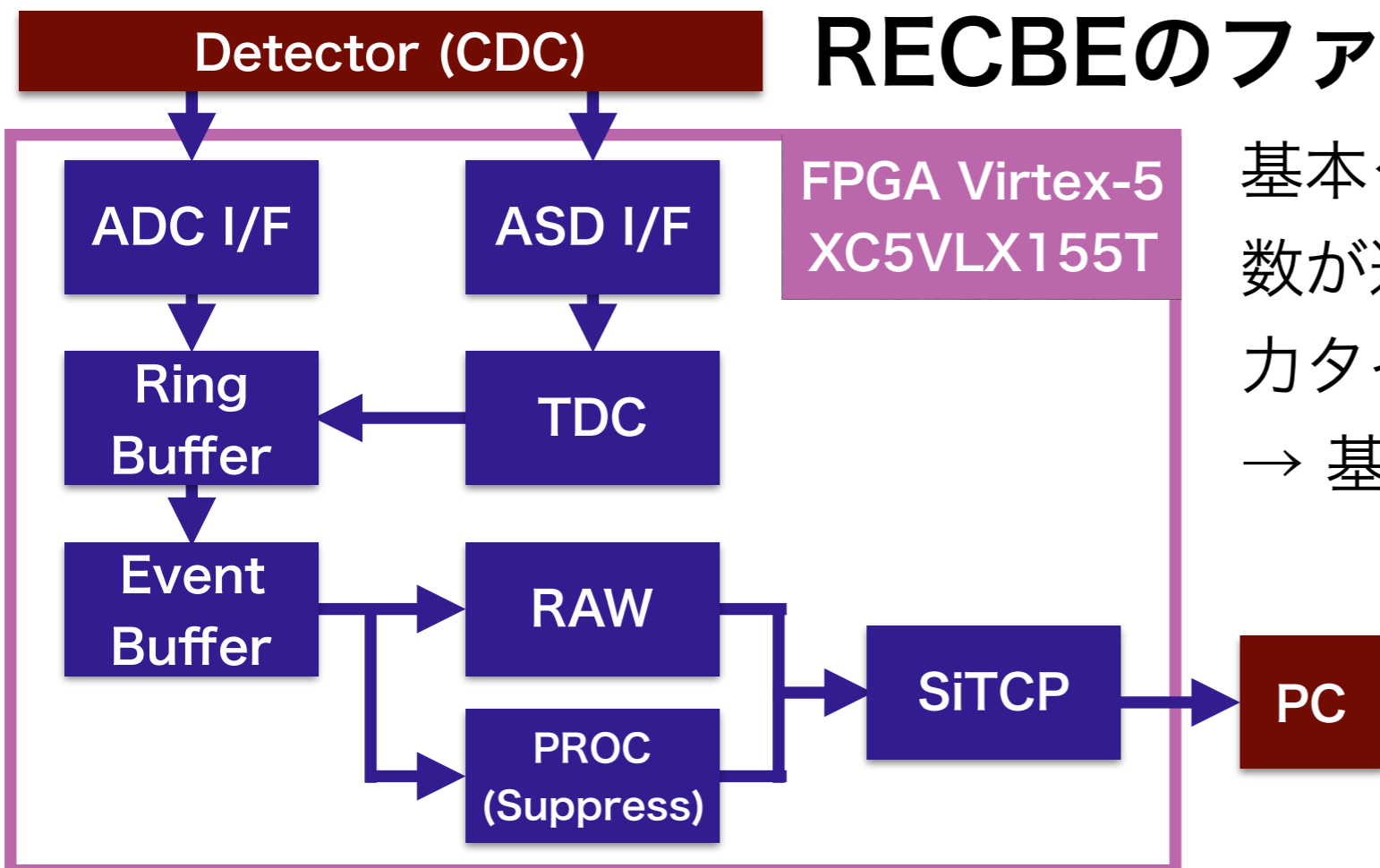


ECCのオプションを持たないバッファでのエラーは修復も検出もできない

TMRを実装することでこの問題を解決したい

簡易 Triple Modular Redundancy

RECBEのファームウェア構成

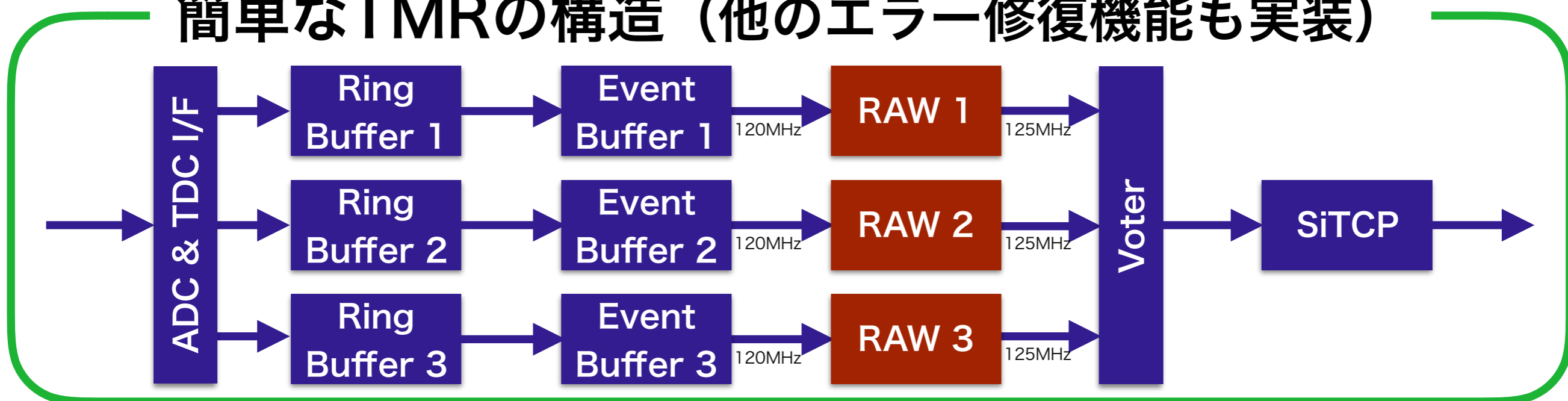


基本クロックとSiTCPクロックの周波数が違うため、各TMRモジュールの出力タイミングがたまにずれる
→ 基本クロックを125 MHzに変更

RAW Modules

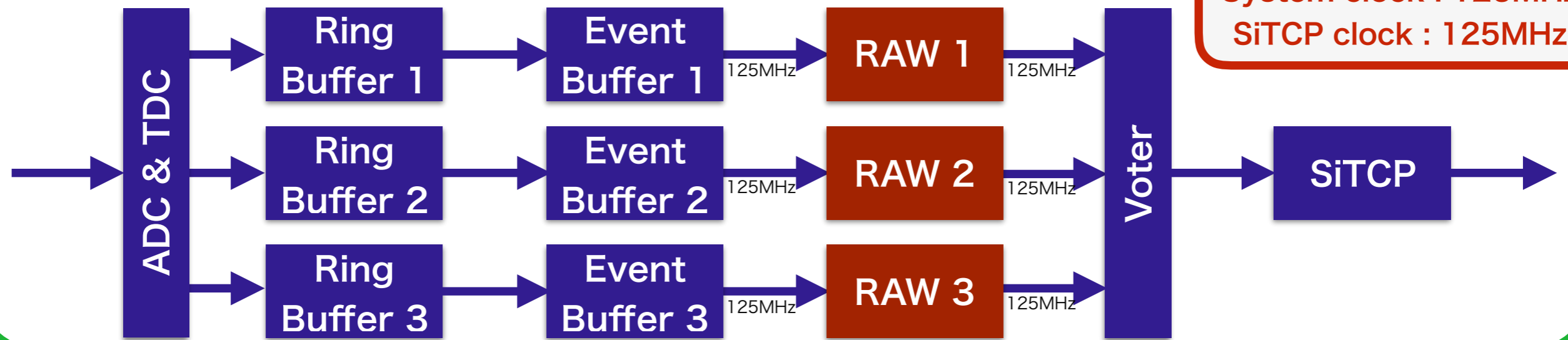
基本クロック : 120MHz
SiTCPクロック : 125MHz

簡単なTMRの構造 (他のエラー修復機能も実装)

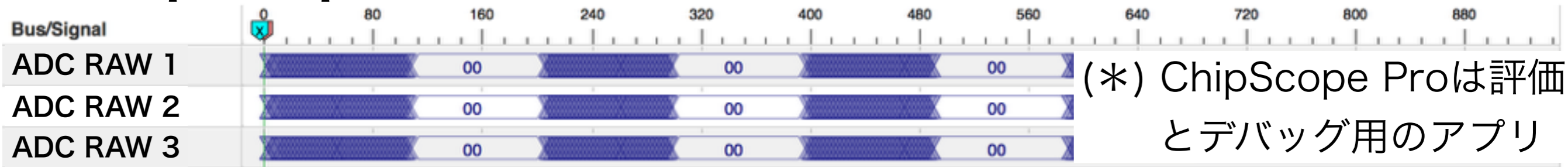


簡易 Triple Modular Redundancy

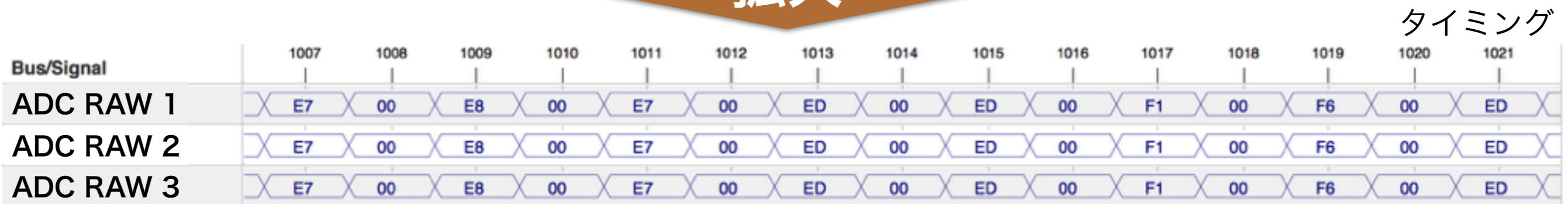
簡単なTMRの構造 (他のエラー修復機能も実装)



ChipScope Pro (Xilinx Inc.) を使ったタイミング確認



拡大



3つのRAWモジュールからの出力が同期

中性子照射試験

セットアップ (2016年7月 & 2017年1月)

TANDEM 加速器 @神戸大学

ビーム : ~3 MeV 重陽子

標的 : Be (ϕ 20 mm)

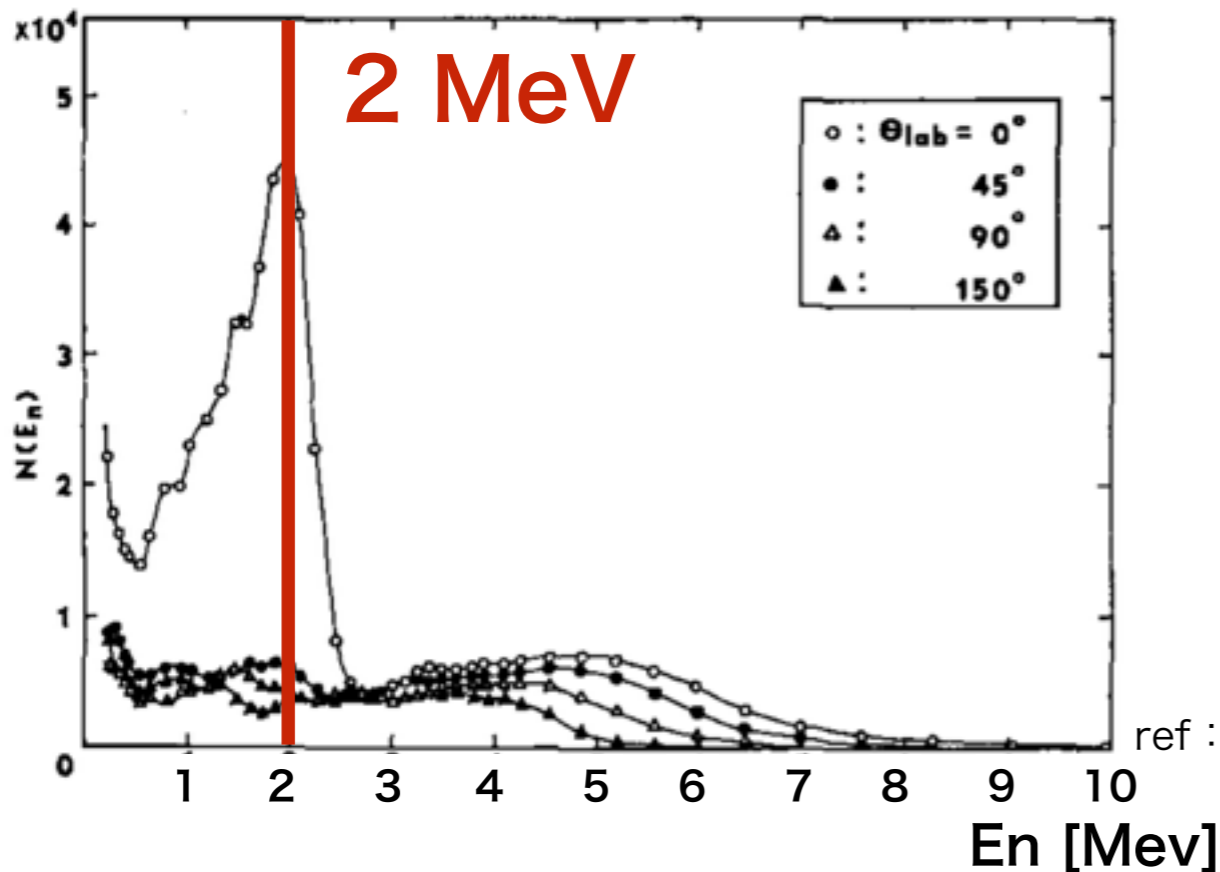
中性子流量 : 1.6×10^6 neutrons/cm²

(標的からの距離 : 10 cm)

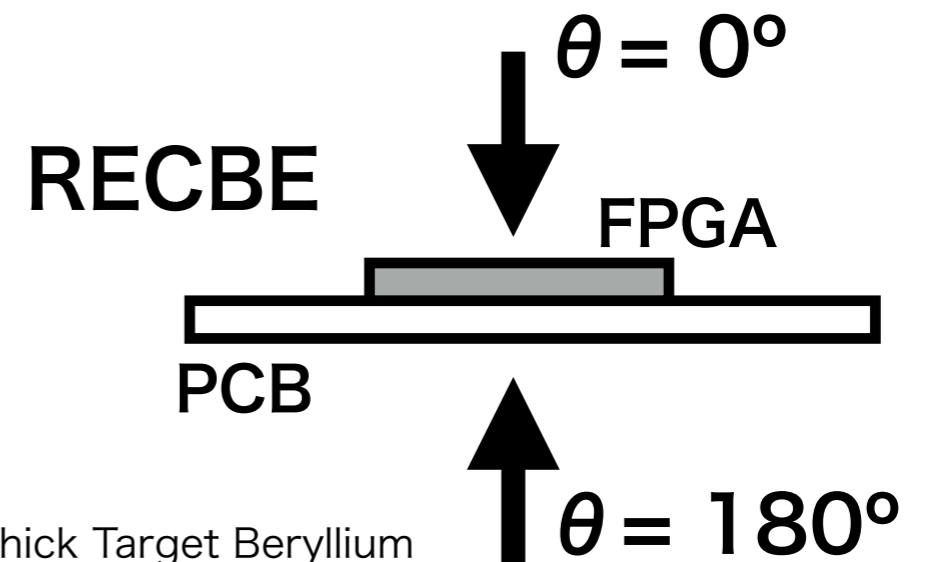
(ビーム電流 : 1 μ A)



中性子のエネルギー分布

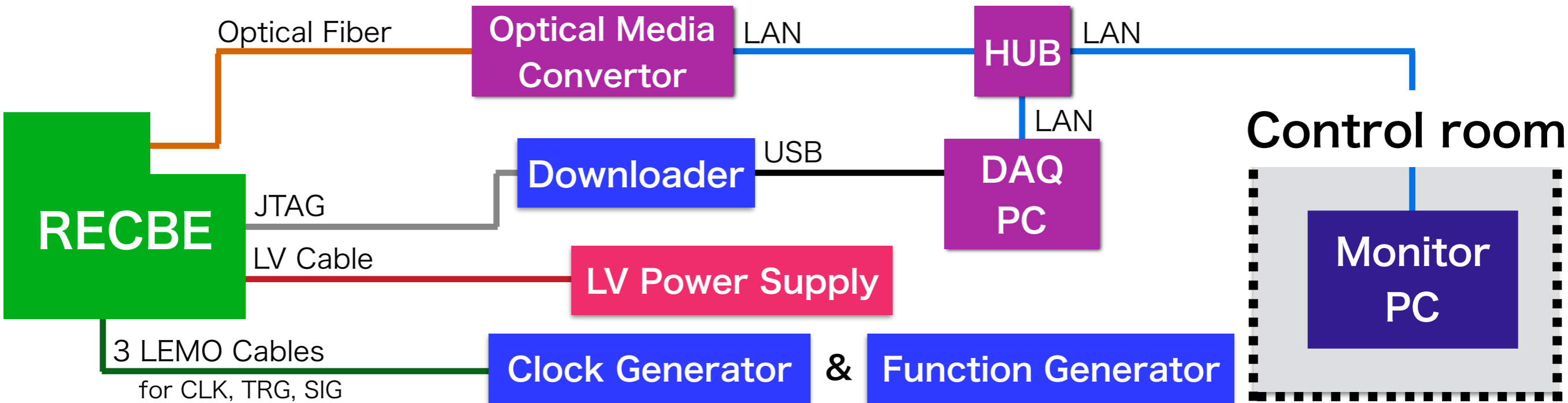


中性子入射角の定義



セットアップ (2016年7月 & 2017年1月)

Radiation area



データロガー



- (*) UDP通信によりSEUやMBEのデータを取得
- (*) データロガーを用いてビーム電流のデータを取得

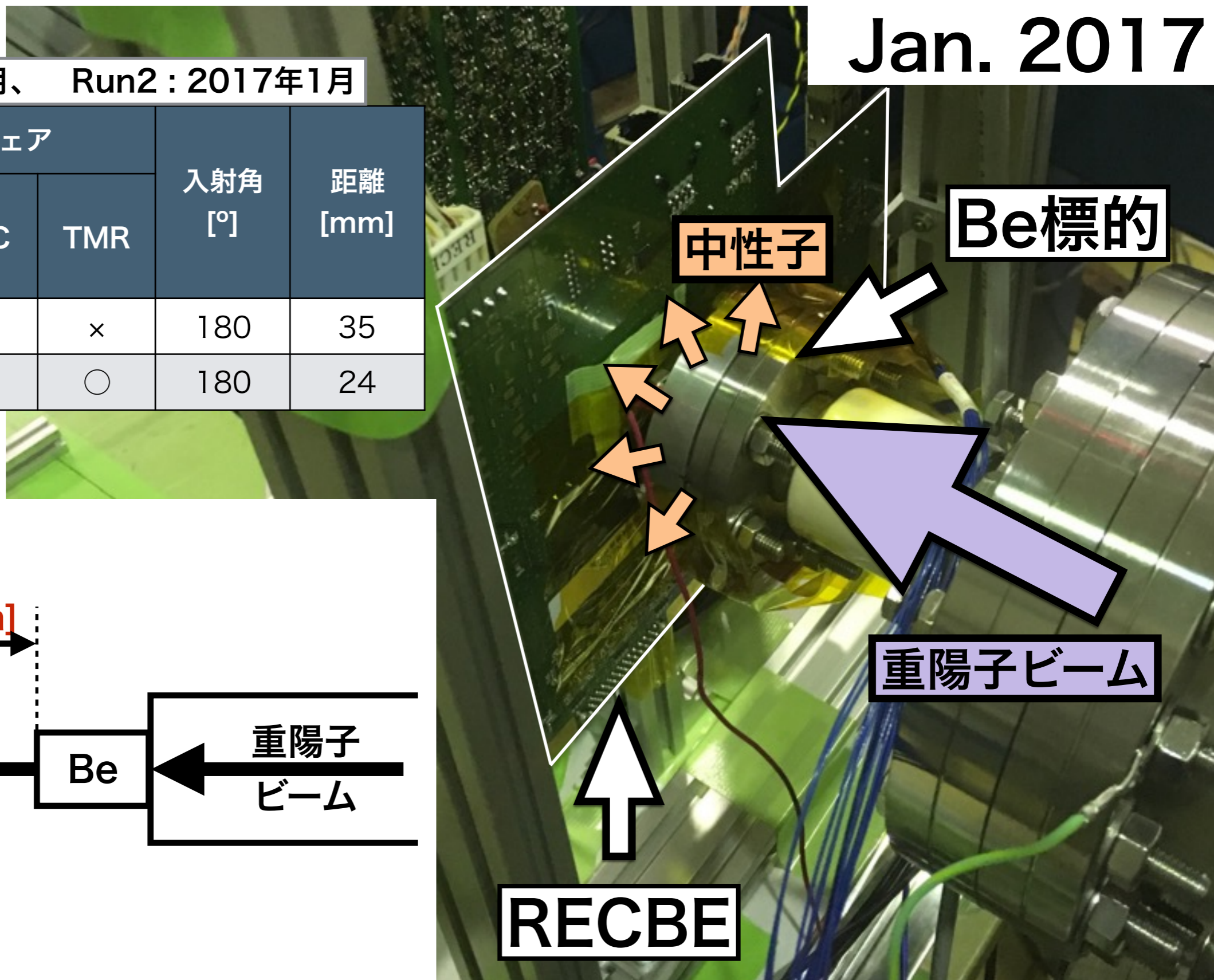
セットアップ (2016年7月 & 2017年1月)

Run1 : 2016年7月、 Run2 : 2017年1月

Run	ファームウェア			入射角 [°]	距離 [mm]
	SEU Controller	ECC	TMR		
1	○	○	×	180	35
2	○	○	○	180	24

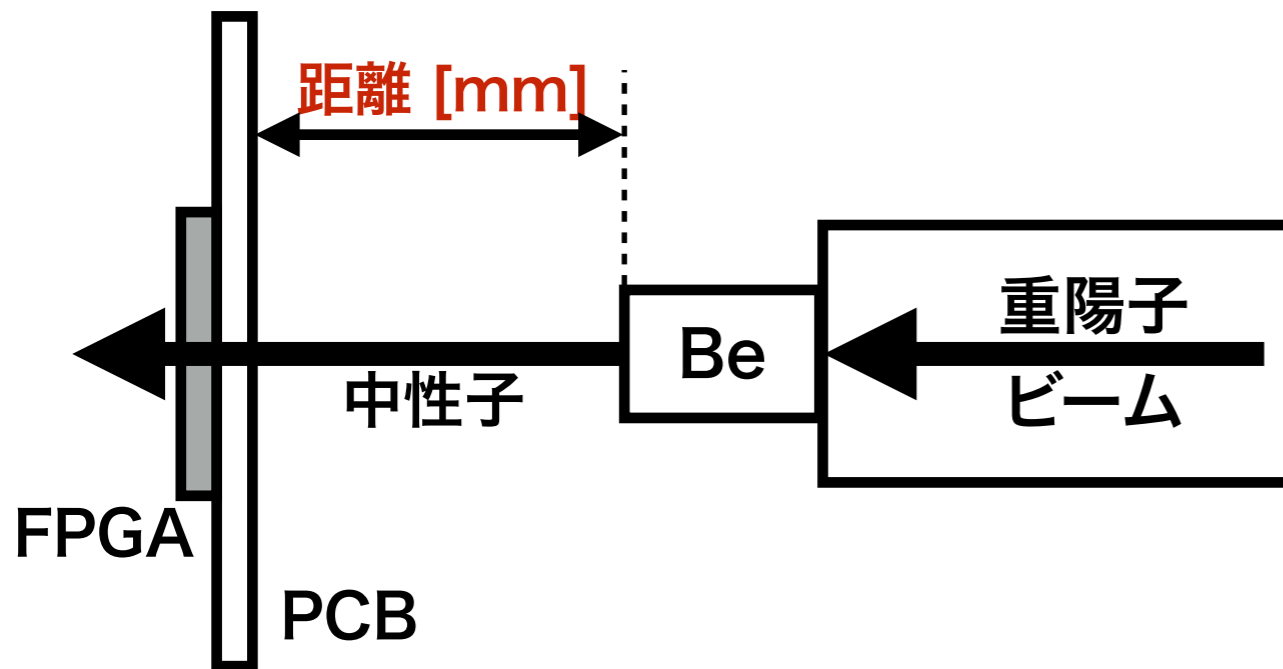
(*) ○ : 有、 × : 無

Jan. 2017



RECBE

距離 [mm]



RECBE

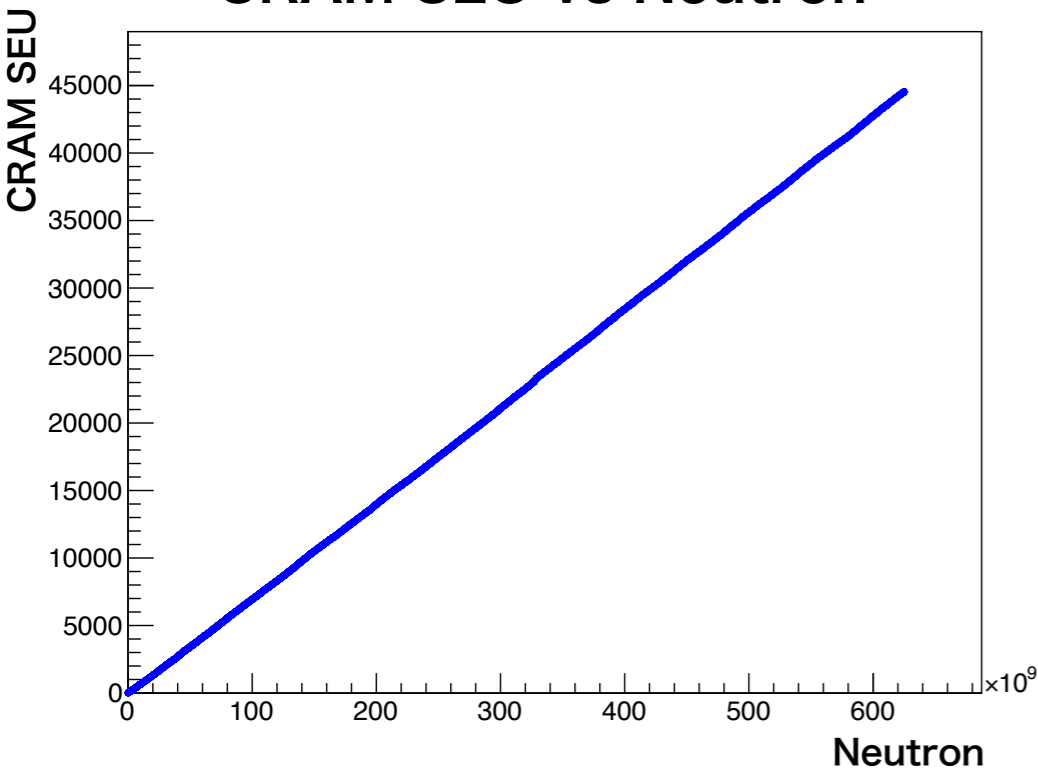
重陽子ビーム

Be標的

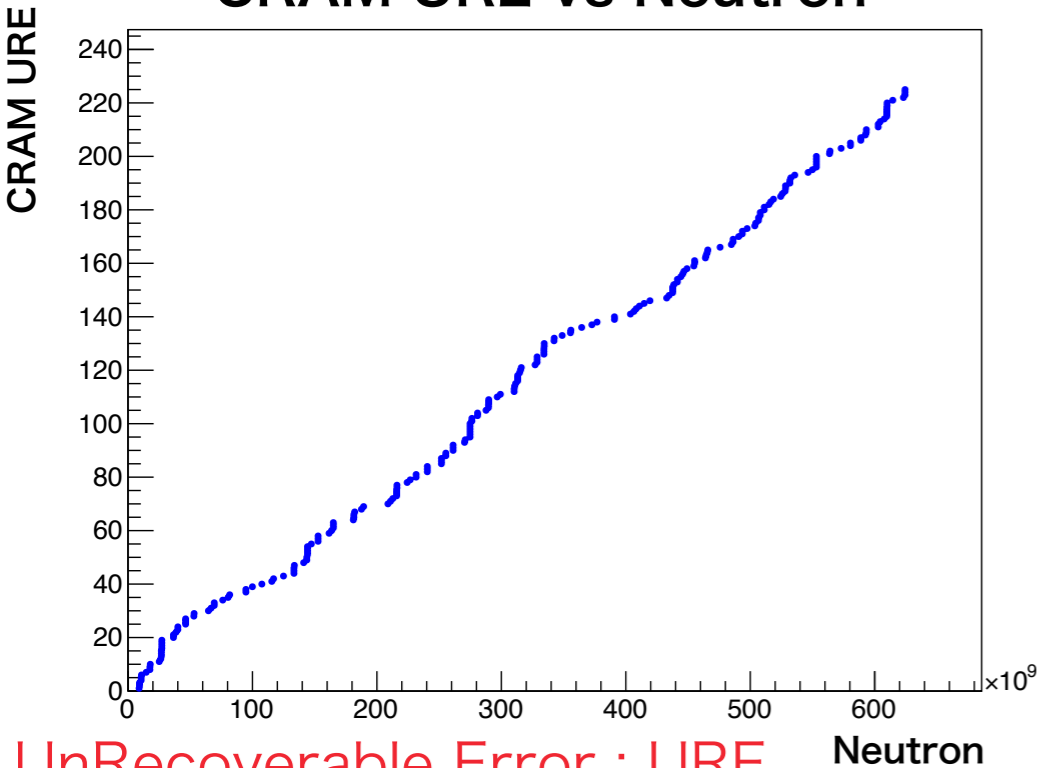
中性子

測定結果例 (2017年1月 : 180°, 24mm)

CRAM SEU vs Neutron



CRAM URE vs Neutron



新しい結果

Run1 : 2016年7月、 Run2 : 2017年1月

Run	距離 [mm]	Angle [°]	Neutron	CRAM			
				SEU	URE	Ns/SEU	Ns/URE
1	35	180	1.2×10^{12}	8880	25	1.4×10^8	4.8×10^{10}
2	24	180	6.2×10^{11}	44537	225	2.2×10^8	4.4×10^{10}

過去の結果

Run	距離 [mm]	Angle [°]	Neutron	CRAM			
				SEU	URE	Ns/SEU	Ns/URE
1	24	180	1.4×10^{12}	66039	233	2.1×10^8	6.0×10^{10}
2	24	0	1.3×10^{12}	45798	166	2.8×10^8	7.8×10^{10}
3	24	180	4.1×10^{12}	20221	60	2.0×10^8	6.8×10^{10}
4	24	180	5.3×10^{12}	16965	53	3.1×10^8	1.0×10^{11}
5	24	180	6.5×10^{12}	22930	76	2.8×10^8	8.5×10^{10}
6	35	180	1.1×10^{13}	56039	163	1.9×10^8	6.5×10^{10}
7	58	0	3.7×10^{12}	12387	27	3.0×10^8	1.4×10^{11}
8	58	0	2.0×10^{12}	7154	18	2.8×10^8	1.1×10^{11}
9	24	0	2.1×10^{12}	7743	22	2.7×10^8	9.6×10^{10}
10	24	0	8.9×10^{12}	32125	99	2.8×10^8	9.0×10^{10}
11	24	0	4.0×10^{12}	14168	36	2.8×10^8	1.1×10^{11}

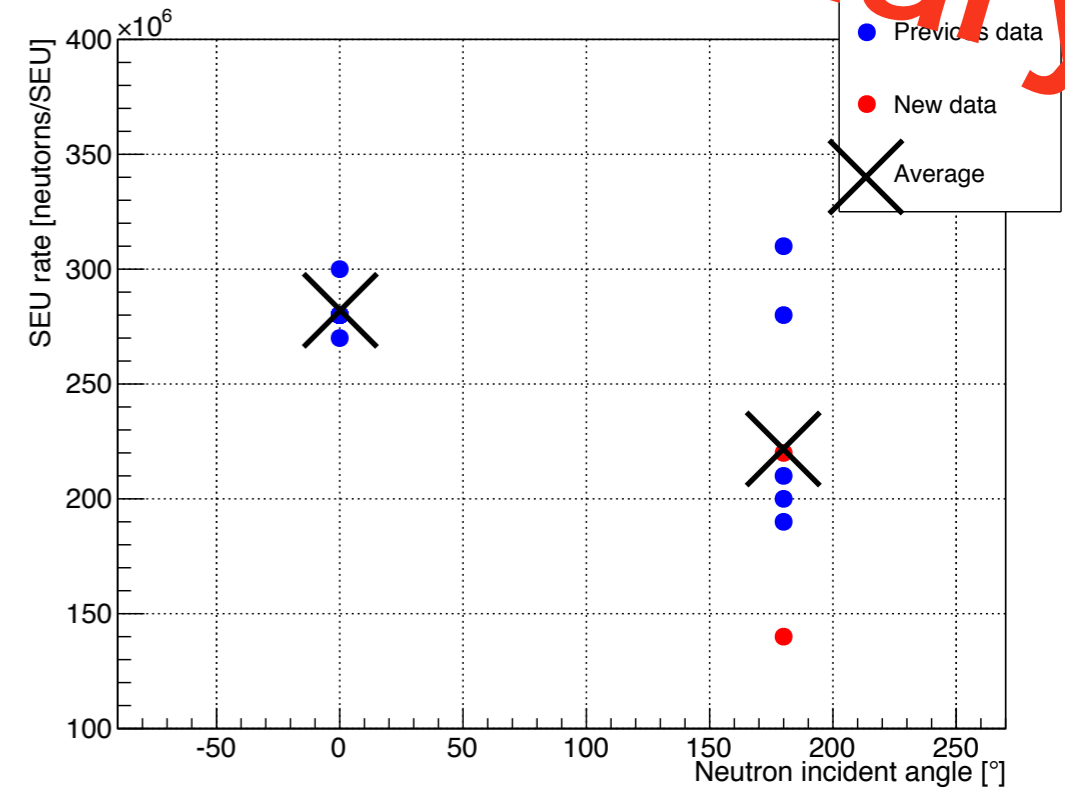
UnRecoverable Error : URE

測定結果：SEU、URE発生頻度

Preliminary

- SEUやUREの発生頻度がオーダでこれまでの試験と一致していることを確認できた
- エラー発生頻度と中性子の入射角との関係
 - ・ データにばらつきがあるため現状は全データの平均値で評価

	Ave. of error rate [neutron/error/XC5VLX155T]
CRAM SEU	2.5×10^8
CRAM URE	8.6×10^{10}



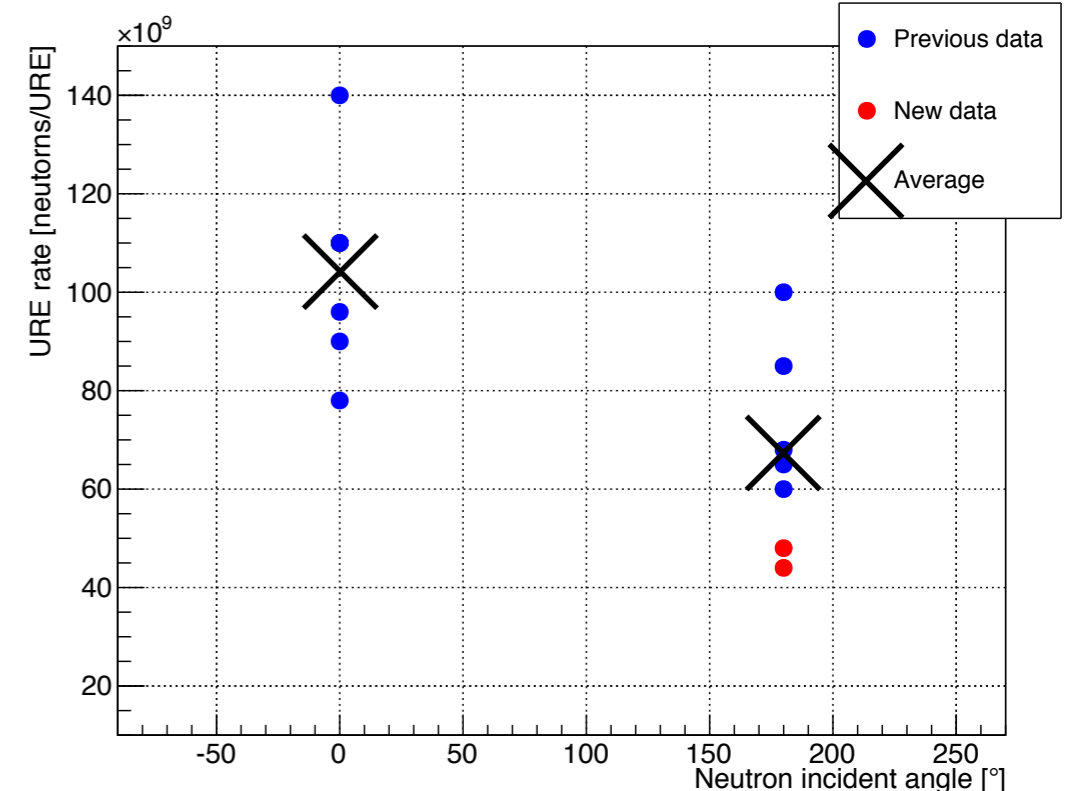
COMET Phase-IにおけるUREの見積もり
URE発生頻度：444 sec/URE/104RECBES

ここまでの結論

- ・ UREが発生する度にファームウェアの再ダウンロードが必要
 - ・ COMET Phase-Iでは444秒に1回程度

問題点

- ・ CRAMにエラーがない時でも波形データ内のエラーを発見 -> 次頁

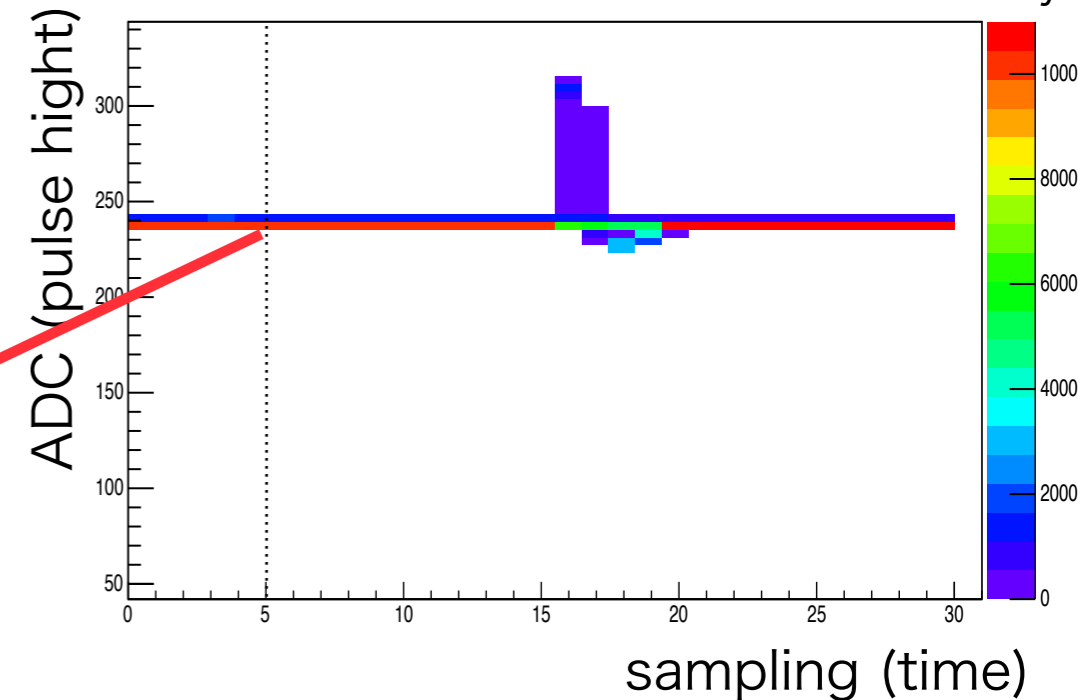


波形データからのエラー探し

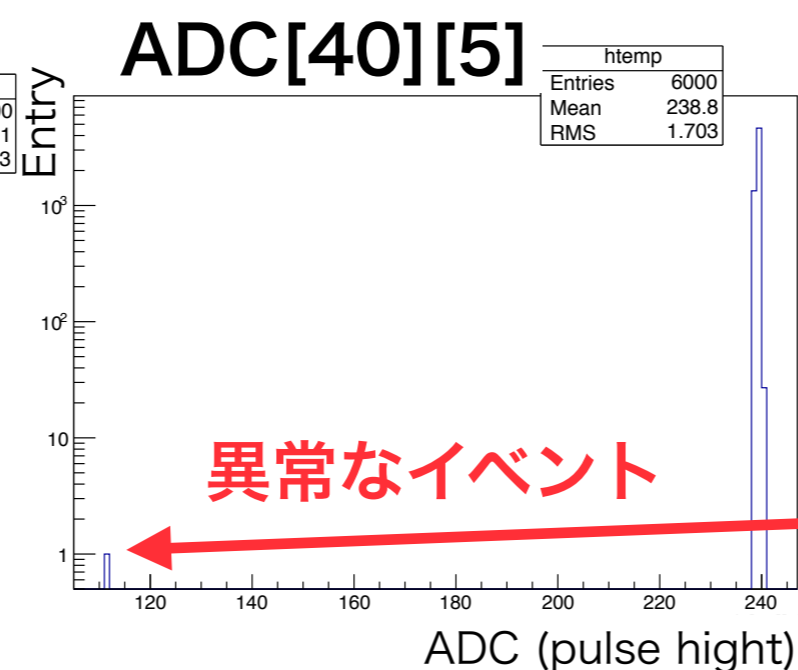
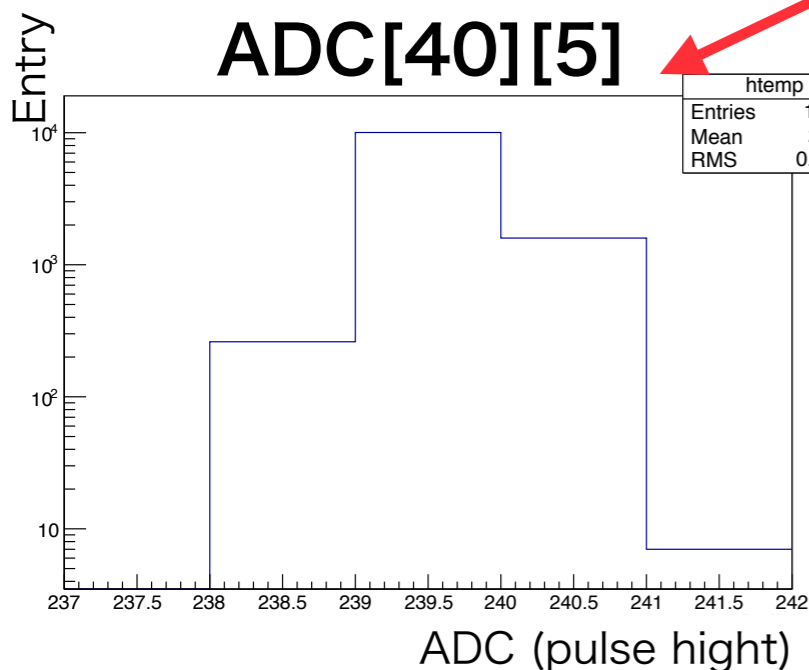
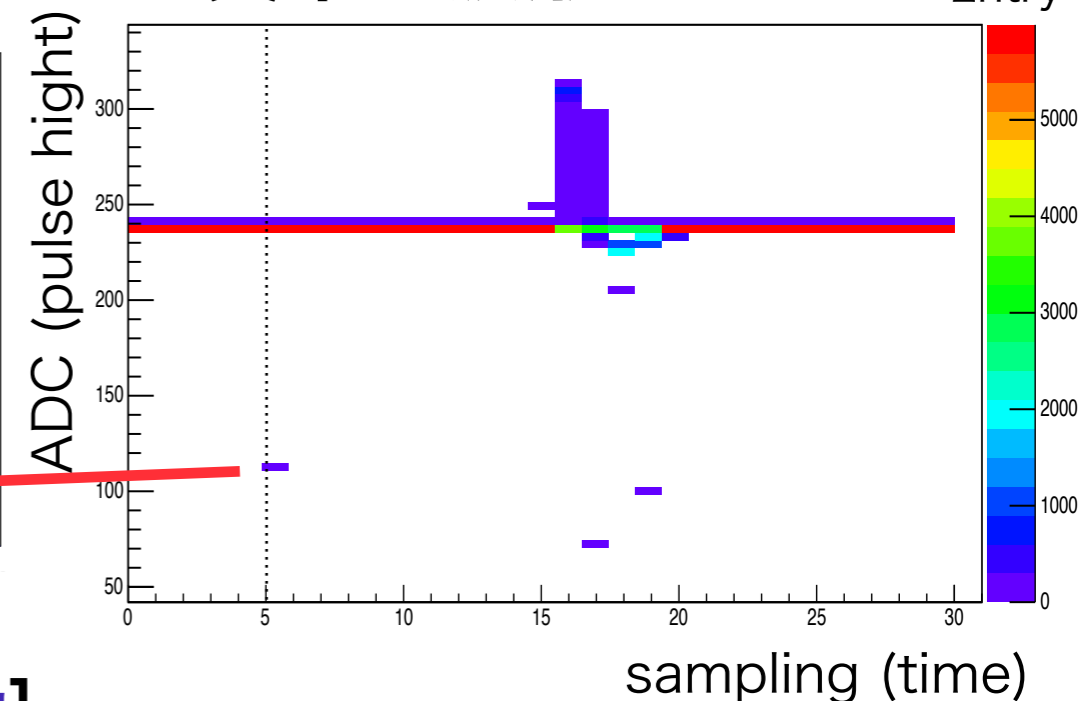
手法

1. 一定時間毎に各チャンネル、各サンプリングについてヒストグラムを作成
2. ヒストグラムの中心値と広がりから異常なイベントを探索
3. 異常なイベントの数を数える

正常な波形 : ch40



異常な波形 : ch40



(*) ADC[channel][sampling]

測定結果：異常な波形

Preliminary

Run	ファームウェア			全イベント数	エラーイベント数	平均中性子流量 [n/sec/cm ²]	エラー率 [%] (COMET換算)
	SEU Controller	ECC	TMR				
6 (過去)	○	×	×	5167117	313131	1.2×10^7	0.046
1	○	○	×	372831	22507	1.9×10^7	0.029
2	○	○	○	5340923	26161	2.8×10^7	0.002

(*) COMET換算では本実験の中性子流量を元にした

● 成果

- ・ エラー対策機能を追加していくことで、エラー率を削減できた
 - ・ COMET Phase-I 換算で0.002%

● 課題

- ・ エラーイベントを完全に削除できたわけではない
 - ・ エラーイベントのタグ付け
 - ・ 現状で検出されないエラーの検出方法の開発
- ・ SEU Controller、ECC、TMR全てを実装するとBRAMの使用率が100%
 - ・ 部分的なTMRの構造に変更

まとめ

COMET Phase-I

- AI原子中でのミュオン電子転換過程をS.E.S. 3×10^{-15} で探索 (2019年)
- 高い運動量分解能を要求する飛跡検出器 : Cylindrical Drift Chamber
- Belle-IIで開発されたCDC用の読み出しボード : 104 RECBES

読み出しボードの中性子によるエラーの評価

- SEU Controller (CRAM)とECC (BRAM)、TMR (BRAM)を実装したファームウェアの中性子照射試験
 - ・ CRAMのエラー率はこれまでの試験結果とオーダで一致
- COMET Phase-IにおけるURE発生頻度の見積もり
 - ・ URE発生頻度 : 444 sec/URE/104boards (~7.4 min)
- 機能を追加していくことによるエラー発生頻度の削減
 - ・ エラー率 : 0.002% (COMET Phase-I 換算)
- 課題
 - ・ エラーイベントを完全に削除できたわけではない
現状で検出されないエラーの検出方法の開発...
 - ・ SEU Controller、ECC、TMR全てを実装するとBRAMの使用率が100%
効果的な部分にのみTMRを実装

	Ave. error rate n/error/XC5VLX155T
CRAM SEU	2.5×10^8
CRAM URE	8.6×10^{10}

23rd ICEPP Symposium (2017.02.19 - 22)

ご静聴ありがとうございました。

2015.03.30